

北京及其北部地区大气自然降尘矿物组成特征

唐 杨^{1,2}, 韩贵琳¹, 徐志方³

1. 中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550002;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘要: 为研究北京地区大气自然降尘的矿物组成特征及其时空变化规律, 采用 XRD 分析了不同季节收集的大气降尘样品。结果表明, 大气降尘主要矿物为石英, 平均含量为 83.19%, 长石以斜长石为主; 降尘中的碳酸盐类矿物主要是方解石和白云石, 它们在降尘中的含量接近其在北方黄土中的含量; 降尘中粘土矿物的含量较少, 为 1.64%~5.88%, 其中有较多的高岭石, 反映了研究区半湿润、较温暖的环境。聚类分析表明本区降尘按矿物组成特征可分为城市和郊区两组。与大风天气少的月份相比, 大风天气频繁的月份降尘中的长石等矿物含量相对较高, 而粘土矿物含量相对较低。

关键词: 北京地区; 大气降尘; 矿物组成; 粘土矿物

中图分类号: P575 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2011)02-0150-06

Mineral Composition Characteristics of Natural Atmospheric Dusts in Beijing and the Northern Areas to Beijing

TANG Yang^{1,2}, HAN Gui-lin¹, XU Zhi-fang³

1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract: A batch of natural atmospheric dust samples collected in Beijing and the northern regions to Beijing in the different seasons were analyzed by X-ray power diffraction to study their mineral composition characteristics and their temporal-spatial distribution. The results showed that Quartz is the main mineral with an average content of 83.19% and that the main Feldspar is Plagioclase, indicating the weakly weathering process of the dust source region. Calcite and dolomite are the main carbonate minerals, representing comparability with the Chinese loess. The dust contains a small amount of clay minerals 1.64%—5.88% of the total mineral mass. Kaolinite is the main content of the clay mineral reflects the semi-wetness, relatively mildness surface environment of the study areas. Clustering analysis indicated that the sampling sites can be classified into two groups (urban and rural) according to the mineral composition characteristics. The dust samples collected in windy months possess relatively higher amount of clay and lower amount of Feldspar than those collected windless months.

Key words: Beijing; atmospheric dust; mineral composition; clay mineral

大气降尘的起源、传输和沉降研究是表生环境领域的重要方向之一。近期的研究进一步证实大气降尘对生态环境的影响是一个全球化的过程^[1,2]。起源于干旱区的沙尘, 传输距离可达数千公里甚至更远^[3], 给远方湿润地区的森林带来丰富的无机养

分, 影响着其土壤的结构、成分, 以及河流或湖泊的无机元素组成^[4~6]; 这些沙尘也吸附和传输了污染物^[7], 影响地球对太阳辐射能量的收支^[8], 而云团中的沙尘则可能影响局地的降水格局^[9]。华北地区是典型的半干旱区, 区内多为沙地、稀疏草地和旱作耕

收稿日期: 2010-05-04 收到, 06-02 改回

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-QN109, KZCX2-YW-306); 国家自然科学基金资助项目(40973088, 40721002)

第一作者简介: 唐杨(1983—), 男, 博士研究生, 专业方向: 环境地球化学。E-mail: tangyang@mails.gyig.ac.cn.

通讯作者: 韩贵琳。E-mail: hanguilin@vip.skleg.cn.

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

地, 植被稀少, 是我国沙尘天气频发的地区之一。每年春季西北风携带着大量的沙尘途经该区域, 从而导致该地区的降尘主要来源于局地表土扬尘, 并混有远距离传输的沙尘^[10, 11], 每年春季, 本区盛行的西北风产生大量沙尘, 给当地工农业生产和居民生活造成重大影响。本文以北京及其北部地区为研究对象, 采集为期 1 年的大气降尘, 研究区内大气降尘的矿物组成特征、时空变化规律及其影响因素。

1 样品处理与测试方法

1.1 采样地点

研究区位于华北北部地区, 区内自东北向西南横跨燕山山脉, 除部分地区出露有岩体外, 地表大多为第四纪黄土所覆盖^[12]。本次研究以北京市为中心, 西北方向延伸至张北, 东北方向延伸至隆化, 基本呈一个三角形的区域。区内共设置了包括北京城区在内的 10 个代表性的采样点(图 1)。

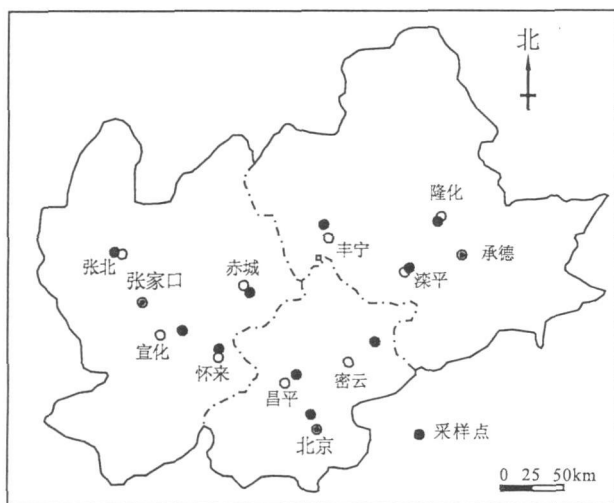


图 1 采样位置图

Fig.1 Map of sample sites

1.2 样品采集

研究的大气降尘样品用湿法收集(GB/T15265-94)。将 20% 的乙二醇(冬天为防冻, 将乙二醇的浓度调整为 50%)收集液加入到聚丙烯材料的桶形集尘缸中收集大气降尘。采样点均位于空旷平地的房顶或楼顶, 将集尘缸置于一定高度的平台之上, 以避免附近扬尘的干扰。集尘缸内加有约 500 mL 的收集液, 并视蒸发情况不定期予以补充, 以保持足够的收集液, 避免降尘的二次起尘; 下雨前及时盖上缸盖, 避免雨水进入, 雨后及时开盖继续收集。

采样时间从 2008 年 3 月至 2009 年 2 月, 按月对样品进行采集, 采集样品共计 111 个。采样时将收集液倒入大口玻璃瓶中, 用超纯水洗净附着于缸

底部和壁上的尘粒, 一并转入玻璃瓶中保存。样品经挑拣去掉树叶、昆虫等杂物后, 全部移入已恒重的蒸发皿内, 并用纯水洗净瓶壁的尘粒。蒸发皿在电热板上 80 °C 蒸干, 105 °C 干燥 1 h, 取出后放入硅胶干燥器, 冷却 1 h, 研磨过 200 目筛备用。

1.3 样品测试

按季(3、5、8、12 月)挑选出部分具代表性的样品(共 39 件)进行矿物组成分析。矿物组成分析在中国科学院地球化学研究所 X 射线粉晶衍射分析室完成。分析仪器为: 日本理学 D/Max-2200 型 X 射线衍射仪, Cu K α 辐射, 石墨单色器滤波, 管电压 40 kV, 管电流 30 mA。样品分析时所采用的扫描速度为 3°(2 θ)/Min, 扫描范围为 3°~50°, 采样步宽(2 θ): 0.02°。根据 X 射线衍射图给出的 d 值, 对照 JCPDS 标准卡片, 鉴定出样品中的各种矿物, 整个测试采用 K 值法求得各矿物相的相对百分含量。

2 结果分析

2.1 各类矿物的出现频度和含量

研究区内 10 个采样点的 39 个降尘样品中, 检出含量 0.1% 以上的矿物共 15 种(表 1), 石英、长石和一些粘土矿物出现频率较高。有 7 种矿物在超过 50% 的降尘样品中都有检测到, 分别是石英、斜长石、伊利石、方解石、蒙脱石、高岭石和锐钛矿, 它们在样品中的平均含量为: 石英 > 斜长石 > 方解石 > 锐钛矿 > 蒙脱石 > 高岭石 > 伊利石。区内大气降尘主要为石英和斜长石, 其中石英最多, 平均含量为 85.17%; 斜长石次之, 平均含量 5.53%。其他的主要矿物有方解石、锐钛矿和白云石等, 三者出现频率分别为 82.93%、65.85% 和 58.54%, 平均含量分别为 4.20%、1.87% 和 2.43%。此外, 粘土矿物也占一定比例。伊利石、蒙脱石和高岭石等粘土矿物在降尘中的频率较高, 其中以伊利石最普遍, 出现率为 92.68%, 平均含量为 0.95%, 蒙脱石的平均含量最高(为 1.82%)。

2.2 降尘中主要矿物的组成特征

研究区降尘主要矿物石英(表 2)在赤城、丰宁、隆化 3 处的含量均超过降尘总量的 90%。石英的抗风化能力强, 主要以碎屑状态存在于表土中。而斜长石的抗风化能力比钾长石弱^[13], 降尘中的长石以斜长石为主, 表明降尘源区所经历的风化程度较弱。此外, 降尘还含有一定量的碳酸盐矿物和粘土矿物。铁矿物在降尘中的平均含量为 0.66%, 据张北和浑善达克沙地表土的铁氧化物研究结果推测^[14], 那里很可能是降尘铁矿物的主要来源地。降

表 1 降尘矿物的组成特征

Table 1 Mineral composition of atmospheric dust depositions

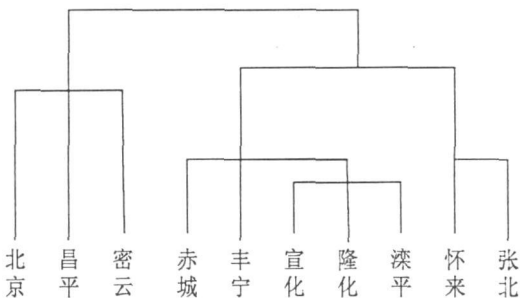
矿物	出现次数	平均含量(%)	含量范围(%)
石英	39	85.17	70.12~94.17
斜长石	39	5.53	0.95~9.26
方解石	33	2.74	0.21~8.36
钾长石	7	2.89	1.36~4.62
白云石	24	2.43	0.40~5.20
锐钛矿	27	1.87	0.25~8.12
蒙脱石	28	1.72	0.32~6.02
高岭石	28	1.09	0.26~3.00
叶蜡石	5	1.05	0.45~2.11
伊利石	36	0.95	0.32~2.66
角闪石	17	0.85	0.30~2.16
绿泥石	2	0.85	0.44~1.25
铁矿物	18	0.66	0.15~1.55
勃姆石	3	0.56	0.32~0.85
石膏	1	0.30	0.30~0.30

表 2 各样点月降尘主要矿物平均含量

Table 2 Average contents of main minerals in monthly atmospheric dust depositions

	北京(城区)	昌平	密云	怀来	宣化	张北	赤城	丰宁	隆化	滦平
石英	77.05	82.06	79.71	82.63	84.94	72.93	91.59	92.13	91.02	86.36
长石	6.50	6.16	6.82	5.05	5.47	11.31	4.92	5.40	5.59	5.41
方解石	3.15	2.14	3.89	5.22	2.63	4.18	1.09	1.26	1.07	1.58
伊利石	1.19	1.05	1.41	0.84	0.81	0.99	0.54	0.70	0.85	0.80
蒙脱石	2.98	2.84	2.78	1.33	1.26	2.52	0.43	0.66	0.39	1.18
高岭石	1.28	1.24	1.82	1.74	0.84	1.02	0.70	0.53	0.44	1.19
白云石	3.04	1.90	3.51	2.86	2.82	0.60	1.31	0.00	2.66	1.60
锐钛矿	3.43	2.95	3.16	0.68	0.74	0.79	1.04	0.00	1.02	2.10
角闪石	1.05	0.86	2.16	0.74	0.32	0.56	0.92	0.75	0.41	0.96
铁矿物	0.69	0.48	1.12	0.46	0.87	0.25	0.26	0.36	0.43	0.88

注:长石(包括斜长石和钾长石)



采用矿物组成平均点间联接

using average linkage of mineral composition

图 2 各点降尘的树状关系图

Fig.2 Dendrogram of atmospheric dust

分碳酸盐矿物,因此降尘中的方解石和白云石很可能主要源自研究区地表的黄土^[17]。一般认为北方黄土的方解石主要是在本地土壤中发生淋溶淀积结晶而成,白云石则可能主要来自风化成土的源

尘中普遍存在锐钛矿,郑南等^[15]在研究北京大气颗粒物时也有发现,其来源尚有待进一步研究。

SPSS 聚类分析的结果表明,降尘按矿物组成特征可以分为两类(图 2),北京(城区)、昌平、密云地区降尘代表了大城市及其周边地区降尘的矿物组成特征;其余 7 个采样点降尘与之相比较,石英、长石等碎屑矿物的比例有所降低,而粘土矿物的比例增高。

2.3 降尘的碳酸盐矿物和粘土矿物

研究区降尘中的碳酸盐矿物主要是方解石和白云石,各采样点降尘中二者的累计平均含量超过 6%,最高与最低含量分别出现在怀来(8.08%)和丰宁(1.26%)。方解石等矿物的含量较高反映了研究区弱淋滤的风化环境^[6]。由于研究区表土含有部

区^[18]。方解石的粒度和微形态研究都证明粗颗粒物中仍然含有许多原生方解石,来自源区的土壤^[19]。怀来降尘的碳酸盐矿物含量为 8.08%,较其他采样点高,可能与其特殊的地质背景有关,该点附近的中元古代铁岭组主要为一套滨海—浅海碳酸盐岩沉积组合,该点的降尘可能受其影响。

粘土矿物是母岩物质的风化产物,不同的气候条件下它们有不同的矿物组合^[20]。研究表明,黄土的粘土矿物以伊利石为主,其次有高岭石、蒙脱石、绿泥石、蛭石及少量无序或有序混层结构的矿物^[20, 21];不同气候条件下的黄土由于风化程度不同,形成的粘土矿物组合也不同,对比西北干冷气候和东南暖湿气候下生成的粘土矿物,后者的绿泥石含量逐渐减少,而蛭石含量逐渐增多^[21]。

研究区各个样点降尘中粘土矿物含量很少,变化范围为 1.64%~5.88%,其中北京(城区)、昌平、

密云三点降尘的粘土矿物含量较高,而赤城、丰宁、隆化三点降尘的粘土矿物含量相对较低(图3)。吕森林等^[23]研究了北京北三环附近大气PM₁₀中粘土矿物含量,得出其变化范围为11%~49%,远高于本次研究。北京地区大气尘观测多为悬浮态的细颗粒物PM₁₀和PM_{2.5}等^[23-25], Han等^[26]的观测结果表明北京大气的悬浮态细颗粒物为远距离贡献较多,而粘土矿物一般为粒径小于2 μm的细颗粒物,易于搬运^[27],故其在PM₁₀中含量要高于粒度较粗的大气降尘。在我国北方干旱区和上海的观测结果也证实:与大气悬浮颗粒物相比,大气降尘粒径较粗且粘土矿物含量相对较低^[13, 28]。

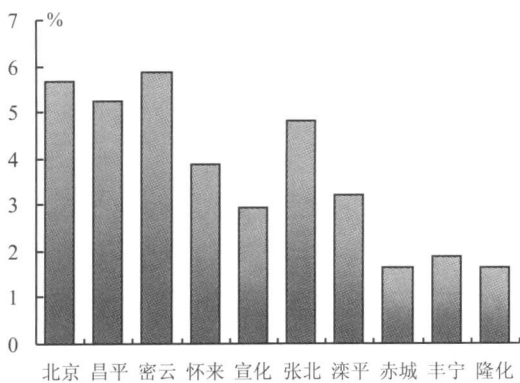


图3 各样点降尘粘土矿物平均含量
Fig.3 Average contents of clay minerals in monthly atmospheric dust depositions

降尘中的粘土矿物为蒙脱石、高岭石和伊利石,三者占粘土矿物的比例分别为40.59%, 30.68%和28.19%,其中蒙脱石的含量可能包含了伊-蒙混层矿物^[29]。与地处西北干旱荒漠区的城市兰州相比,研究区大气降尘中伊利石含量减少而高岭石的含量明显增加,表明研究区气候比西北地区更为暖湿^[30, 31]。伊利石是低气温、弱碱性条件下长石和云母等铝硅酸盐矿物风化脱钾,原生矿物云母结构夹层间部分被取代而成的,可向蒙脱石、高岭石和绿泥石等矿物转变^[19],如伊利石晶格层间钾离子淋失则向蒙脱石转化,气候愈热湿、化学风化作用愈彻底,伊利石将进一步分解转化为高岭石^[32]。研究区年降水量400~800 mm,属于黄土区中降水较多的半湿润地区,有明显的干湿季节交替,这种气候有利于伊利石-蒙脱石-高岭石的转变。

其他地区降尘中常见的绿泥石^[13, 24, 33]在本区很少见,可能由于其在降尘中含量较低,又受仪器检测条件的限制而未能检出。绿泥石一般形成于寒冷干燥气候条件,易于风化形成蛭石-绿泥石混层、蛭

石和蒙脱石等粘土矿物,因此绿泥石只能在化学风化作用受抑制的地区保存下来^[34, 35]。在黄土高原夏季风强的时候,黄土中的绿泥石相对减少^[36]。研究区降尘中绿泥石的缺乏可能是研究区较湿润的气候和较强的夏季风综合作用的结果。

3 降尘矿物组成的季节特征

研究区气候属于温带大陆性季风气候,尽管降尘来源受到盛行风向和风力的影响,但由于研究区降尘主要源于局地扬尘,而地表又主要被第四纪黄土覆盖,因此,各个季节间降尘的矿物组成仍相似(图4)。石英、长石、伊利石和锐钛矿含量季节性变化稍大,其中长石的最高和最低月均含量分别出现在5月(6.45%)和8月(4.22%)。正好与采样期间沙尘暴活动的最强和最弱月份相对应。此外,5月降尘中的伊利石和锐钛矿等矿物的平均含量相对其他月份最低,分别为0.82%和1.01%。

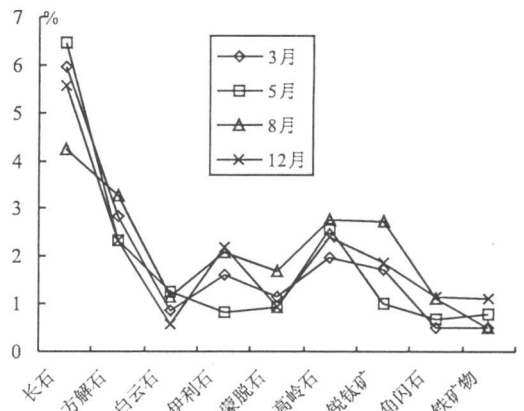


图4 不同季节降尘主要矿物(除石英)月平均含量
Fig.4 Average percent of main minerals (exc. quartz) in dust of different seasons

粘土矿物是长石等矿物的风化产物^[37, 38],各个季节降尘中,石英、长石和粘土矿物间有一定的变化规律(图5)。夏季(8月)降尘中的石英平均含量(79.14%)低于其余季节,长石在各个季节间的变化趋势与石英一致。粘土矿物平均含量随季节的变化趋势则与之相反:夏季(8月)降尘中粘土矿物含量(6.55%)高于其余季节。5月降尘中的粘土矿物含量最低(4.32%)。春季为本区沙尘暴高发的季节,此时大风天气频繁,近地表较粗的颗粒亦被卷入空中形成沙尘,矿物中石英最难风化,常成为较粗的颗粒留在土壤中^[39],因此降尘中较高含量的石英可能来自近距离表土中较粗颗粒组分。而在夏季,沙

尘暴活动较弱,大风天气相对较少,降尘主要来自表土中易被扬起的细颗粒组分,而粘土矿物一般存在于表土的细颗粒组分,此时降尘中粘土矿物含量相对高一些^[40]。

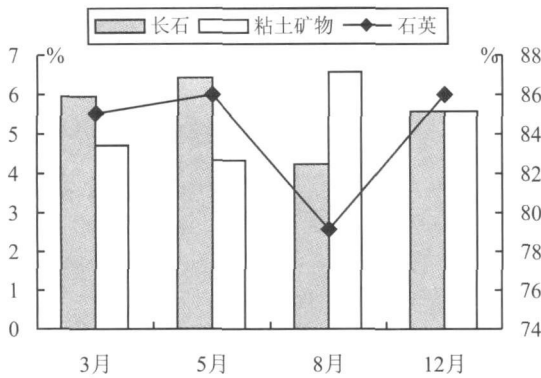


图5 不同季节降尘中石英、长石、粘土矿物的月均含量对比

Fig. 5 Average percent of quartz, feldspar, clay minerals of dust in different seasons

4 结 论

研究区大气降尘的主要矿物为石英(72.93%~92.13%)和长石(4.92%~11.31%)等碎屑矿物。碳酸盐矿物和粘土矿物在降尘中也占一定比例,粘土矿物主要为高岭石、蒙脱石和伊利石。降尘的矿物组成在时空分布上稍有差异。

研究区大气降尘中方解石和白云石含量与北方黄土相似。而降尘中存在较多高岭石而缺少绿泥石,表明暖湿的气候可能促进了伊利石和绿泥石的风化;粘土矿物在本区大气降尘中含量比在北京、兰州等城市大气PM₁₀、PM_{2.5}等悬浮态细颗粒物中的含量低。

研究区各个季节间大气降尘的矿物组成特征整体上相似。夏季降尘的粘土矿物含量高于其它季节,而石英、长石的含量低于其它季节,这可能是季风对不同粒径的尘土选择性搬运的结果。

参考文献 (References):

[1] Andreae M O, Crutzen P J. Atmospheric aerosols: Biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry[J]. *Science*, 1997, 276(5315): 1052—1058.

[2] 李晋昌, 董治宝. 大气降尘研究进展及展望[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(2): 102—109.

Li Jinchang, Dong Zhibao. Research progress and prospect of dustfall research[J]. *J. Arid Land Res Environ*, 2010, 24(2): 102—109. (in Chinese with English abstract)

[3] Martet M, Peuch V H, Laurent B, Marticorena B, Bergametti G. Evaluation of long-range transport and deposition of desert dust with the CTM MOCAGE[J]. *Tellus Series B—Chem-*

ical and Physical Meteorology, 2009, 61(2): 449—463.

[4] McTainsh G, Strong C. The role of aeolian dust in ecosystems [J]. *Geomorph.*, 2007, 89: 39—54.

[5] Reynolds R L, Reheis M, Yount J, Lamothe P. Composition of aeolian dust in natural traps on isolated surfaces of the central Mojave Desert — Insights to mixing, sources, and nutrient inputs [J]. *J. Arid Environments*, 2006, 66(1): 42—61.

[6] Behar J, Gillette D A. Vulnerability of desert biological soil crusts to wind erosion: the influences of crust development, soil texture, and disturbance [J]. *J. Arid Envir.*, 1998, 39(2): 133—142.

[7] Yuan H, Zhuang G S, Li J, Wang Z F, Li J. Mixing of mineral with pollution aerosols in dust season in Beijing: Revealed by source apportionment study [J]. *Atmosph. Envir.*, 2008, 42(9): 2141—2157.

[8] Carrico C M, Kus P, Rood M J, Quinn P K, Bates T S. Mixtures of pollution, dust, sea salt, and volcanic aerosol during ACE-Asia: Radiative properties as a function of relative humidity [J]. *J. Geoph. Res. Atmosph.*, 2003, 108(D23), 8650. doi: 10.1029/2003JD003405.

[9] Sullivan R C, Moore M J K, Petters M D, Kreidenweis S M, Roberts G C, Prather K A. Effect of chemical mixing state on the hygroscopicity and cloud nucleation properties of calcium mineral dust particles [J]. *Atmosph. Chem. Phys.*, 2009, 9(10): 3303—3316.

[10] 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 张增祥, 王一谋, 周自江, 鞠洪波, 黄签. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策[J]. *地理学报*, 2000, 55(5): 513—521.

Ye Duzheng, Chou Jifan, Liu Jiuyan, Zhang Zengxiang, Wang Yimou, Zhou Zijiang, Ju Hongbo, Huang Qian. Causes of Sand-stormy Weather in Northern China and Central Measures [J]. *Acta Geog. Sinica*, 2000, 55(5): 513—521. (in Chinese with English abstract)

[11] Yang X P, Liu Y S, Li C Z, Song Y L, Zhu H P, Jin X D. Rare earth elements of aeolian deposits in Northern China and their implications for determining the provenance of dust storms in Beijing [J]. *Geomorphology*, 2007, 87(4): 365—377.

[12] Liu T S, Ding Z L. Chinese loess and the paleomonsoon [J]. *Ann Revi Earth Planet Sci*, 1998, 26: 111—145.

[13] 师育新, 戴雪荣, 宋之光, 俞立中, 管章志. 上海春季沙尘与非沙尘天气大气颗粒物粒度组成与矿物成分 [J]. *中国沙漠*, 2006, 26(5): 780—785.

Shi Yuxin, Dai Xuerong, Song Zhiguang, Yu Lizhong, Guan Zhangzhi. Particle size distribution and mineral components of atmospheric particles collected in spring of Shanghai [J]. *J. Desert Res.*, 2006, 26(5): 780—785. (in Chinese with English abstract)

[14] Kim H, Hwang H, Ro C U. Single-particle characterization of soil samples collected at various areas of China, using low-Z particle electron probe X-ray microanalysis [J]. *Spectrochi. Acta Part B Atomic Spectr.*, 2006, 61(4): 393—399.

- [15] 郑南, 王河锦. 大气可吸入颗粒物中锐钛矿的发现及意义[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(6): 1570—1572.
Zheng Nan, Wang Hejin. Discovery of anatase in atmospheric inhalable particles and its significance[J]. Spectr. Spec. Anal., 2009, 29(6): 1570—1572. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张铭杰, 张昱, 李小虎, 王记周, 孟广路, 史宝光. 干旱半干旱地区土壤矿物组成特征及其环境意义[J]. 兰州大学学报(自然科学版)[J], 2007, 43(3): 1—7.
Zhang Mingjie, Zhang Yu, Li Xiaohu, Wang Jizhou, Meng Guanglu, Shi Baoguang. Mineral composition of soil in the arid and semiarid region and their environment significance[J]. J. Lanzhou Univ. (Natural Sci.), 2007, 43(3): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [17] 赵景波. 黄土的本质与形成模式[J]. 沉积学报, 2003, 21(2): 198—204.
Zhao Jingbo. The Essence and Formation Model of the Loess[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(2): 198—204. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
Liu Tongsheng. Loess and environment[M]. Beijing: Sciences Press, 1985 (in Chinese)
- [19] 陈秀玲, 方小敏, 安芷生, 韩文霞, 王鑫, 白艳, 洪滢. 黄土高原 8.1 Ma 以来方解石记录的夏季风演化[J]. 中国科学(D 辑), 2007, 37(1): 61—70.
Chen Xiuling, Fang Xiaomin, An Zhisheng, Han Wenxia, Wang Xin, Bai Yan, Hong Ying. An 8.1 Ma Calcite record of Asian summer monsoon evolution on the Chinese central Loess Plateau[J]. Science in China (series D), 2007, 37(1): 61—70. (in Chinese)
- [20] 汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 粘土矿物的环境意义[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 337—344.
Tang Yanjie, Jia Jianye, Xie Xiande. Environment significance of clay minerals[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 337—344. (in Chinese with English abstract)
- [21] 师育新, 戴雪荣, 宋之光, 张卫国, 王立群. 我国不同气候带黄土中粘土矿物组合特征分析[J]. 沉积学报, 2005, 23(4): 690—695.
Shi Yuxin, Dai Xuerong, Song Zhiguang, Zhang Weiguo, Wang Liqun. Characteristics of clay mineral assemblages and their spatial distribution of Chinese loess in different climatic zones[J]. Acta Sediment. Sinica, 2005, 23(4): 690—695. (in Chinese with English abstract)
- [22] 吕森林, 邵龙义. 北京市可吸入颗粒物(PM₁₀)中单颗粒的矿物组成特征[J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(4): 421—424.
Lv Senlin, Shao Longyi. Mineral compositions of individual particulates in PM₁₀ over Beijing[J]. Acta Petrol. Miner., 2003, 22(4): 421—424. (in Chinese with English abstract)
- [23] Whittaker A G, Jones T P, Shao L, Shi Z, BeruBe K A, Richards R J. Mineral dust in urban air: Beijing, China[J]. Miner. Magaz., 2003, 67(2): 173—182.
- [24] 郑南, 吉昂, 王河锦, 徐廷婧, 李婷. 北京市冬季霾天气可吸入颗粒物的矿物学研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2009, 45(5): 825—832.
Zheng Nan, Ji Ang, Wang Hejin, Xu Tingjing, Li Ting. Mineralogical study on inhalable particles during the haze period in Winter Beijing[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2009, 45(5): 825—832. (in Chinese with English abstract)
- [25] 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, Steven H C, Tai Chan, Patricia A M. 北京市大气 PM_{2.5} 中矿物成分的污染特征[J]. 环境科学, 2004, 25(5): 26—30.
Yang Fumo, He Kebin, Ma Yongliang, Steven H C, Tai Chan, Patricia A M. Characteristics of Mineral Component in Ambient PM_{2.5} in Beijing[J]. Envir. Sci., 2004, 25(5): 26—30. (in Chinese with English abstract)
- [26] Han L H, Zhuang G S, Cheng S Y, Li J. The mineral aerosol and its impact on urban pollution aerosols over Beijing, China[J]. Atmosph. Envir., 2007, 41(35): 7533—7546.
- [27] 董红梅, 宋友桂. 粘土矿物在古环境重建中的应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(6): 119—130.
Dong Hongmei, Song Yougui. Clay mineralogy and its application to paleoenvironmental reconstruction[J]. Marine Geol. Quat. Geol., 2009, 29(6): 119—130. (in Chinese with English abstract)
- [28] Zhang X Y, Zhang G Y, Zhu G H, Zhang D, An Z S, Chen T, Huang X P. Elemental tracers for Chinese source dust[J]. Science in China (D) 1996, 39(5): 512—521.
- [29] 陆琦, 刘惠芳, 雷新荣. 蒙脱石+伊/蒙混层+伊利石等粘土矿物混合物相 X 射线定量分析方法——模拟定量法[J]. 矿物学报, 1993, 12(1): 12—20.
Lu Qi, Liu Hui芳, Lei Xinrong. Simulating quantitative analysis method—quantitative analysis of clay mineral mixtures of montmorillonite, illite/smectite interstratified clay minerals, illite, chlorite and some others[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1993, 12(1): 12—20. (in Chinese with English abstract)
- [30] 肖正辉, 邵龙义, 孙珍全, 张宁, 李卫军. 兰州市取暖期可吸入颗粒物中单颗粒矿物组成特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(1): 64—69.
Xiao Zhenghui, Shao Longyi, Sun Zhenquan, Zhang Ning, Li Weijun. Mineral compositions of individual particles in the inhalable particulate matter in the Lanzhou air during heating period[J]. Bull. Miner. Petrol. Geochem., 2007, 26(1): 64—69. (in Chinese with English abstract)
- [31] 肖正辉, 邵龙义, 张宁, 李卫军. 兰州市一次沙尘暴期间 PM₁₀ 的矿物组成特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009, 28(2): 177—182.
Xiao Zhenghui, Shao Longyi, Zhang Ning, Li Weijun. Mineralogical characteristics of PM₁₀ collected before and during dust storm episode in Lanzhou City, Northwestern China[J]. Bull. Miner. Petr. Geochem., 2009, 28(2): 177—182. (in Chinese with English abstract)

- to hydrocarbons [J]. *Acta Petro. Sinica*, 2005, 26 (5): 48—52. (in Chinese with English abstract)
- [67] Kiyosu Y, Krouse H R. The role of organic-acid in the abiogenic reduction of sulfate and the sulfur isotope effect [J]. *J. Geoch.*, 1990, 24(1): 21—27.
- [68] 王奖臻, 李朝阳, 李泽琴, 李葆华, 刘文周. 川、滇、黔交界地区密西西比河谷型铅锌矿床与美国同类矿床的对比 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2002, 21(2): 127—132.
Wang Jiangzhen, Li Chaoyang, Li Zeqin, Li Baohua, Liu Wenzhou. The Comparison of Mississippi Valley-type lead-zinc deposits in southwest of China and in mid-continent of United States [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2002, 21(2): 127—132. (in Chinese with English abstract)
- [69] Daneshfar B, Desrochers A, Budkewitsch P. Mineral-potential mapping for MVT deposits with limited data sets using landsat data and geological evidence in the Borden Basin, Northern Baffin Island, Nunavut, Canada [J]. *Natural Res. Res.*, 2006, 15(3): 129—149.
-
- (上接第 155 页)
- [32] Hunziker J C, Frey M, Clauer N, Dallmeyer R D, Friedrichsen H, Flehmig W, Hochstrasser K, Roggwiler P, Schwander H. The evolution of illite to muscovite: mineralogical and isotop data from the Glarus Alps Switzerland [J]. *Contrib. Miner. Petrol.*, 1986, 92: 157—180.
- [33] 罗莹华, 戴塔根, 梁凯, 刘明. 韶关市大气降尘矿物成分和形貌特征研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2006, 25(2): 162—164.
Luo Yinghua, Dai Tagen, Liang Kai, Liu Ming. Mineral composition and morphology of atmospheric dustfall in Shaoguan City [J]. *Acta Petrol. Miner.*, 2006, 25(2): 162—164. (in Chinese)
- [34] 胡双熙, 张建明, 王建永. 我国半干旱地区土壤特性与可持续发展 [J]. *中国沙漠*, 2002, 22(5): 476—483.
Hu Shuangxi, Zhang Jianming, Wang Jianyong. Soil property and sustainable development in semi-arid area of China [J]. *J. Desert Res.*, 2002, 22(5): 476—483. (in Chinese with English abstract)
- [35] Gingele F X, De Deckker P, Hillenbrand C D. Late quaternary fluctuations of the leeuw in current and palaeoclimates on the adjacent land masses: Clay mineral evidence [J]. *Australian J. Earth Sciences*, 2001, 48(6): 867—874.
- [36] Gylesjo S, Arnold E. Clay mineralogy of a red clay-loess sequence from Lingtai, the Chinese Loess Plateau [J]. *Global and Planetary Change*, 2006, 51(3—4): 181—194.
- [37] 李晓燕, 蒋有录, 陈涛. 风化粘土层——半风化石型不整合的矿物学、地球化学特征 [J]. *地球科学*, 2009, 34(3): 429—434.
Li Xiaoyan, Jiang Youlu, Chen Tao. Mineralogical and geochemical characteristics of unconformity structure with weathered clay and sapropelic rock [J]. *Earth Sci.*, 2009, 34(3): 429—434. (in Chinese with English abstract)
- [38] 李福春, 李莎, 杨用钊, 程良娟. 原生硅酸盐矿物风化产物的研究进展——以云母和长石为例 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2006, 25(5): 440—448.
Li Fuchun, Li Sha, Yang Yongzhao, Cheng Liangjuan. Advances in the study of weathering products of primary silicate minerals, exemplified by mica and feldspar [J]. *Acta Petr. Miner.*, 2006, 25(5): 440—448. (in Chinese with English abstract)
- [39] 田晖, 杜佩轩. 西安市路面积尘不同粒径矿物组成研究 [J]. *环境科学与技术*, 2006, 29(7): 26—37.
Tian Hui, Du Peixuan. Mineral composition of road dust with different grain diameter in Xi'an [J]. *Environ. Sci. Tech.*, 2006, 29(7): 26—37. (in Chinese with English abstract)
- [40] Yuan H, Zhuang G S, Rahn K A, Zhang X Y, Li Y L. Composition and mixing of individual particles in dust and nondust conditions of north China spring 2002 [J]. *J. Geoph. Res.—Atmospheres*, 2006, 111, D20208, doi: 10. 1029/2005JD006478.